

Simulación y optimización de una copa de inducción con partes móviles mediante el método de los elementos finitos 2D/3D

N. Vidal¹, G. Aguirre-Zamalloa², J. M. Barandiarán¹, J. Gutiérrez¹, A. García-Arribas¹

¹ Departamento de Electricidad y Electrónica
Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco
Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa (Spain)
Tel.:+34 94 601 2554, fax:+34 94 601 3071, e-mail: webvilen@lg.ehu.es

² Departamento de Ingeniería Eléctrica
E.T.S.I.I., Universidad del País Vasco
Alda Urquijo s/n, 48013 Bilbao (Spain)

Resumen. Se han analizado las características del par de fuerza de un dispositivo electromagnético que funciona como caudalímetro. Mediante MagNet (programa de simulación de campos magnéticos de baja frecuencia basado en elementos finitos), se han simulado modelos tanto en dos como en tres dimensiones, con partes en movimiento relativo [1] obteniendo valores muy aproximados a los medidos en el laboratorio. Con objeto de optimizar la configuración del dispositivo para maximizar el par de frenado resultante, se han realizado simulaciones con varias modificaciones en su configuración, consiguiendo aumentar su valor de forma considerable.

Palabras llave

Método de los elementos finitos, software MagNet, corrientes inducidas, par de frenado.

1. Introducción

En el marco del proyecto “Nuevos hidrogenadores y caudalímetros electromagnéticos para aplicaciones en calderas y calentadores de gas” que se está desarrollando en el Departamento de Electricidad y Electrónica (EHU/UPV) en colaboración con la empresa COPRECI, se ha estudiado el diseño de un dispositivo electromagnético que realice una doble función: por un lado, que genere en el calentador de agua la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento utilizando como fuente de energía el caudal del agua entrante en el calentador, y por otro que mida este caudal para optimizar el proceso de calentamiento.

El trabajo presentado en este artículo corresponde a las simulaciones realizadas mediante elementos finitos de la parte del caudalímetro. El análisis del generador está en la actualidad en estudio.

En la configuración que se ha adoptado originalmente, este dispositivo está compuesto por un imán permanente de NeodimioHierro Boro ($r_{\text{int}} = 8 \text{ mm}$, $r_{\text{ext}} = 10.5 \text{ mm}$) de

5 pares de polos, inserto en un casquillo de aluminio o “copa de inducción” ($r_{\text{int}} = 11,2 \text{ mm}$, $r_{\text{ext}} = 14.2 \text{ mm}$) (ver figura 1). Con objeto de maximizar el par de frenado hemos analizado la influencia del número de polos del imán; también se ha estudiado el efecto de añadir uno o dos anillos de hierro (en posición interior, exterior o ambas) para acortar el camino efectivo para el flujo y poder así aumentar la inducción disponible con la idea de mejorar el par. El material del anillo considerado es de Remko: Soft Pure Iron, directamente de la librería de materiales de MagNet ($r_{\text{int}} = 7 \text{ mm}$ y $r_{\text{ext}} = 8 \text{ mm}$).

Las simulaciones han sido realizadas considerando un imán de cinco pares de polos con imanación sinusoidal. Tras haber estudiado este caudalímetro con otro patrón de imanación (imanación radial a trozos) hemos llegado a la conclusión de que el modelo más aproximado al imán físico es el de imanación sinusoidal. Recientemente los resultados anteriores han sido publicados en otra comunicación [2].



Fig. 1. Geometría del dispositivo simulado: casquillo, imán permanente y anillo de hierro en posición interna.

2. Procesado

Se han realizado simulaciones dinámicas [1] con movimiento (rotacional) relativo del casquillo con respecto al imán permanente a diferentes velocidades de servicio, tanto en 2D (análisis previo imprescindible, ver Tabla I.) como en 3D. La herramienta utilizada ha sido “Transient Solver with Motion” que forma parte del paquete MagNet suministrado por la empresa Infolytica [2]. MagNet es un programa de simulación de campos magnéticos de baja frecuencia basado en elementos finitos [3,4].

El método de los elementos finitos (MEF) es una potente herramienta para el diseño de máquinas eléctricas y otros dispositivos electromagnéticos, ya que de esta manera es posible predecir el comportamiento de un dispositivo físico sin necesidad de recurrir a la construcción de prototipos. En este caso debemos usar el MEF en tres dimensiones, para considerar todas las direcciones que pueden tomar las corrientes inducidas.

En todos los casos se ha utilizado la simetría del modelo para únicamente simular una parte del dispositivo, lo que representa una considerable ventaja debido al menor tiempo de cálculo necesario. Esta estrategia resulta ser esencial en 3D para que los tiempos de cálculo no sean excesivamente grandes y no se exceda la capacidad de memoria del ordenador.

El hardware utilizado en la mayoría de los modelos, ha sido un Pentium 4 con 512 MB de memoria RAM a 2.4 GHz, bajo el sistema operativo Windows XP. Dadas las limitaciones de memoria, para realizar las simulaciones del modelo completo (sin reducción por simetría) en 3D ha sido necesario emplear otra máquina más potente (modificada para tener 3GB de memoria virtual en lugar de 2GB como es habitual). Tal y como muestra la Tabla I los tiempos de cálculo necesarios en 3D son muy superiores a los utilizados en 2D.

TABLA I. Tiempos de cálculo en 2D/3D para un mismo modelo reducido por simetría.

	2D	3D
Tiempo de cálculo (minutos)	1	247
Nº elementos	3.554	182.000
Memoria (KB)	5.504	123.443

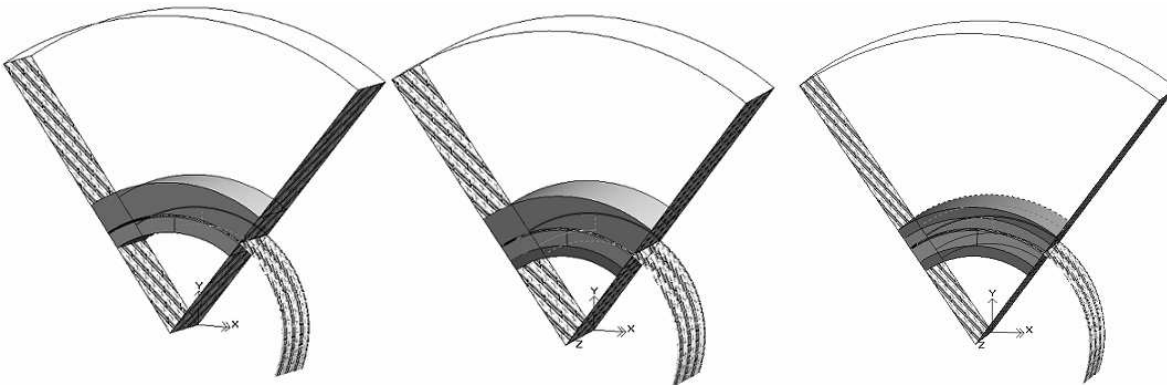


Fig 2. Configuración de los modelos reducidos por simetría con 0, 1 o 2 anillos.

Al utilizar la herramienta “Transient Solver with Motion” de MagNet, es necesario crear en el modelo el componente denominado “Motion Component”, compuesto por la parte del dispositivo que gira y un componente adyacente de aire que se desliza sobre otra parte de aire. Debido a esta necesidad de separar los componentes en movimiento de los componentes estáticos, la estructura del entrehierro es algo compleja. Las simulaciones han sido realizadas considerando un imán de cinco pares de polos con imanación sinusoidal, que es el modelo más aproximado al imán físico. Debido al funcionamiento del software, no podemos incluir el imán en el “motion component”, ya que el imán giraría pero su imanación se quedaría quieta; así que, hemos enfocado el problema desde otro punto de vista: dejamos fijo el imán y hacemos girar el casquillo.

Dadas las características del programa comercial, una vez diseñado el modelo debe incluirse un componente de aire que recubra todo nuestro dispositivo. Este “air box” representa una condición de contorno artificial que rodea todo el modelo. En la figura 2 se muestran algunos de los modelos utilizados. En ella se pueden apreciar las condiciones de contorno y todos los componentes del dispositivo, incluido el “motion component”.

La ecuación fundamental para el campo magnético con imanes permanentes se puede escribir como,

$$\text{rot } v \text{ rot } \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 + v \text{ rot } \mathbf{M} \quad (1)$$

donde v es la reluctividad, v_0 es la reluctividad del vacío, \mathbf{A} es el potencial vector magnético, \mathbf{M} es la imanación del imán permanente y \mathbf{J}_0 es la densidad de corriente.

Pese a que en el análisis tridimensional el software nos permite la opción de usar el método de las sucesivas sustituciones, el método de linealización utilizado en todos los casos ha sido el de Newton-Raphson. El sistema de matrices linealizado se resuelve mediante el Método de Gradiente Conjugado, se ha elegido un valor del factor de tolerancia del gradiente conjugado de 0.001%, un valor menor al habitual debido a la presencia de corrientes inducidas.

Para el cálculo del par de fuerza en un dispositivo electromagnético usando el MEF hay básicamente dos

métodos: el método del trabajo virtual y el método del tensor de tensión de Maxwell. En este caso, el par de fuerza se implementa utilizando este último método. El tensor de tensión de Maxwell calcula el par de fuerza integrándolo sobre una superficie definida. Este método es más simple y más barato respecto un punto de vista computacional porque sólo necesita una única distribución de campo para una posición dada.

Uno de los aspectos más críticos a la hora de obtener buenos resultados en las simulaciones es el mallado. En este caso, se ha realizado un mallado controlado en el entrehierro y especialmente en el casquillo, donde debido a la presencia del efecto película se han empleado, en cada caso, elementos de talla inferior o igual a la profundidad de penetración de las corrientes inducidas, cuyo orden de magnitud es,

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma_{Al} \cdot \mu_0}} \quad (1)$$

A 1810 rpm se obtiene una profundidad de penetración de $\delta \approx 6.4$ mm.

Hay ciertos aspectos diferentes en el procesado de los análisis en 2D y 3D; por ejemplo, en 2D el orden del polinomio debe ser el mismo en todo el modelo; en cambio en 3D podemos fijar órdenes de polinomio distintos para los diferentes componentes del modelo. En este caso, un polinomio de segundo orden ha sido suficiente para obtener buenos resultados en 2D. En 3D, se ha aprovechado esta potencialidad y se ha optado por un polinomio de orden 1 en el “air box”, de orden 3 en el casquillo y de orden 2 en el resto (incluido el entrehierro).

Se ha optado por no usar el mallado adaptativo dado que con ello no se obtienen mejores resultados y el tiempo de cálculo crece notablemente. En la Figura 3 se muestra el aspecto de los mallados en 2D y 3D.

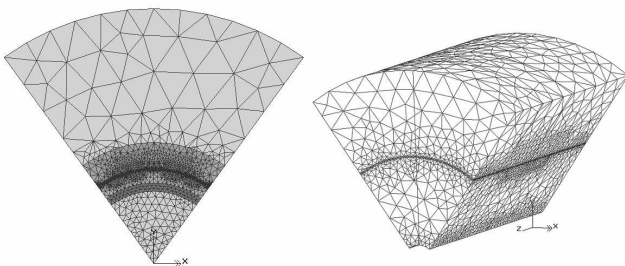


Figura 3. Vista de los mallados en 2D y 3D

Del mismo modo, se ha calculado cuidadosamente el tiempo de discretización (t_{step}) máximo de la integración transitoria en función de la velocidad de rotación. Para calcularlo, como norma general, se debe seguir la siguiente relación:

$$t_{step} < \tau / 2 \quad (2)$$

Donde la escala temporal natural del problema τ :

$$\tau(s) = \frac{60}{n(rpm) \cdot P} \quad (3)$$

A 1810 rpm se ha empleado un tiempo de discretización de 0.1 ms.

3. Resultados

El objetivo de este estudio es optimizar la configuración del dispositivo para maximizar el par de frenado, ya que es la magnitud de mayor interés para esta aplicación. Tras simularlo y hacer una comparativa de los resultados obtenidos en 2D y 3D con los medidos en el laboratorio, se ha variado su geometría en algunos parámetros, tales como, la introducción de varios anillos de hierro, y el número de polos del imán. Los resultados se van a presentar para una velocidad de giro de 1810 rpm, por ser la velocidad de giro estimada para el dispositivo real.

A. Comparativa entre simulación y medida

Se ha realizado un análisis bidimensional previo, lo que ha aportado datos esenciales para abordar correctamente el análisis 3D. En la figura 4 se muestran los mapas y las líneas de flujo (componente z del potencial vector) del dispositivo sin ningún anillo para diferentes instantes de tiempo. La parte que gira es la denominada “Motion Component”.

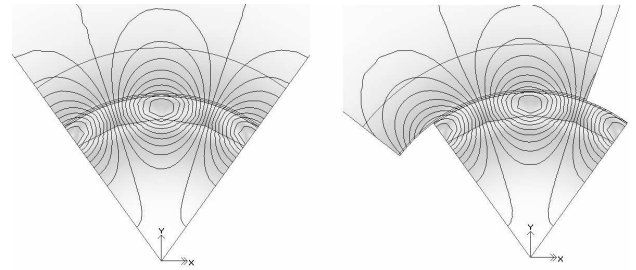


Figura 4. Mapas de flujo para los instantes de tiempo $t = 0$ y $t = 1.5$ ms.

Se ha comprobado que el modelo reducido por simetría y el modelo completo de 360° dan valores equivalentes en las simulaciones, por lo que se ha optado por utilizar el modelo reducido por simetría para reducir el tiempo de cálculo.

Se han hecho varias simulaciones variando la velocidad de giro, obteniendo como era de esperar que cuanto mayor es la velocidad de giro el par de frenado obtenido es mayor (Fig 5).

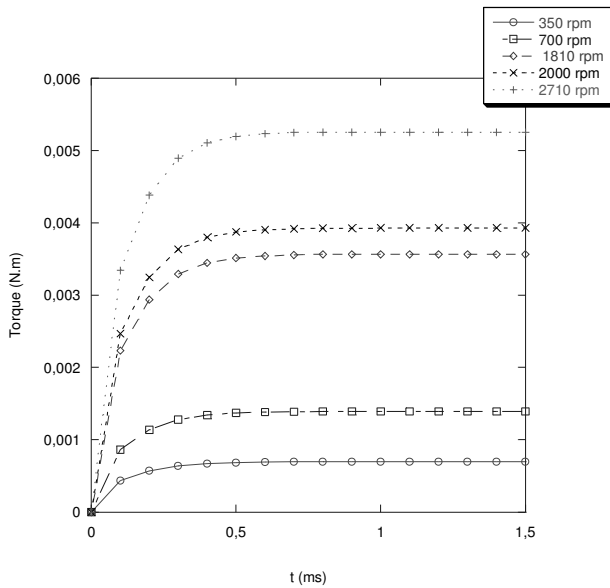


Figura 5. Transitorio de arranque. Torque para diferentes velocidades de giro. Análisis bidimensional.

En ambos análisis la relación que sigue el par de frenado con la velocidad es lineal, como podía esperarse tratándose de materiales lineales. Por otra parte, tal y como se preveía, el análisis tridimensional nos revela un par de frenado menor, lo que se ajusta más a la realidad debido a las direcciones que pueden tomar ahora las corrientes inducidas. En la figura 6 se puede observar que los resultados obtenidos en las simulaciones y las medidas realizadas en el laboratorio se ajustan apropiadamente.

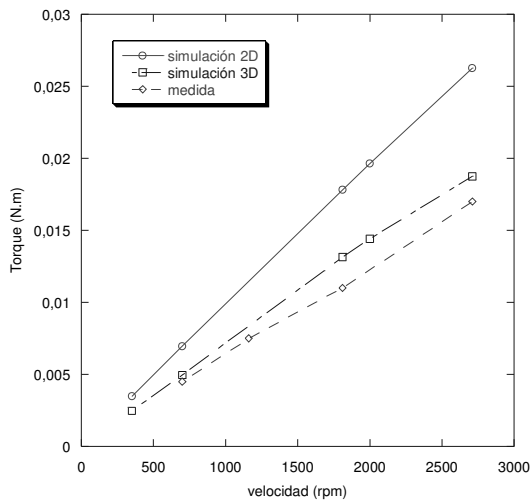


Fig 6. Par de frenado medido y simulado

B. Inclusión de anillos

Se ha estudiado el efecto de añadir uno o dos anillos de hierro (en posición interior, exterior o ambas) para acortar el camino efectivo del flujo y poder así aumentar la inducción disponible con la idea de mejorar el par. El anillo considerado es de Remko: Soft Pure Iron de la librería de materiales de MagNet (Figura 3).

Como se puede apreciar en la figura 7 el aumento del torque al incluir anillos de hierro en el circuito magnético es muy significativo.

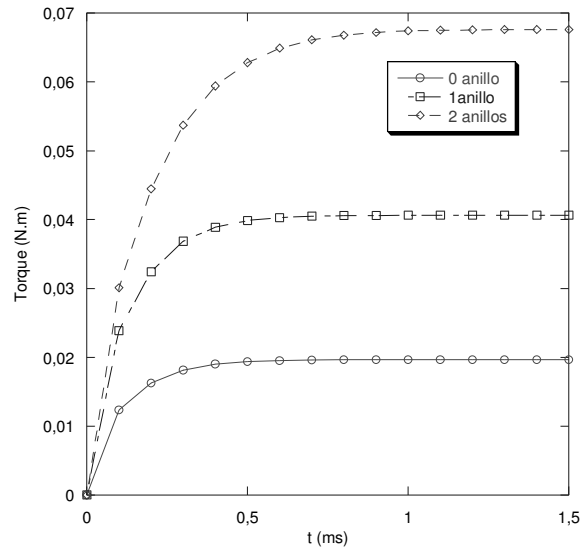


Fig. 7. Par de frenado para configuraciones con 0, 1 y 2 anillos.

La influencia de los anillos queda reflejada en la figura 8 donde podemos ver la diferencia en el mapa de flujo de las configuraciones correspondientes a 1 y 2 anillos. Pueden compararse con la configuración sin ningún anillo mostrada previamente en la figura 4.

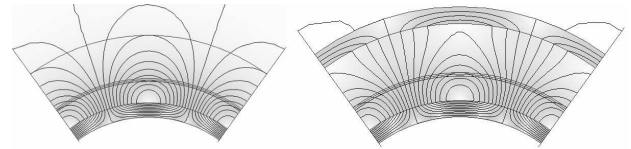


Figura 8. Mapas de flujo de las configuraciones con 1 y 2 anillos en el instante $t=0$.

C. Influencia del número de polos

Se ha analizado la influencia del número de polos del imán permanente. Para esto, se han considerado configuraciones de 1 hasta 8 pares de polos y se han repetido las simulaciones en 2D para el modelo completo. Tal y como se observa en la figura 11, se consigue un torque máximo para la configuración de 4 pares de polos. Esto es algo razonable ya que por un lado, cuanto mayor es el número de polos mayor es la densidad de flujo B_{max} en el casquillo (figura 10) pero por otro lado, cuanto más cerca están los polos antes se cierran las líneas de flujo, y estas líneas de flujo que cortan el casquillo son las que producen las corrientes inducidas responsables del par de frenado. En la figura 9 vemos la forma que adoptan las líneas de flujo.

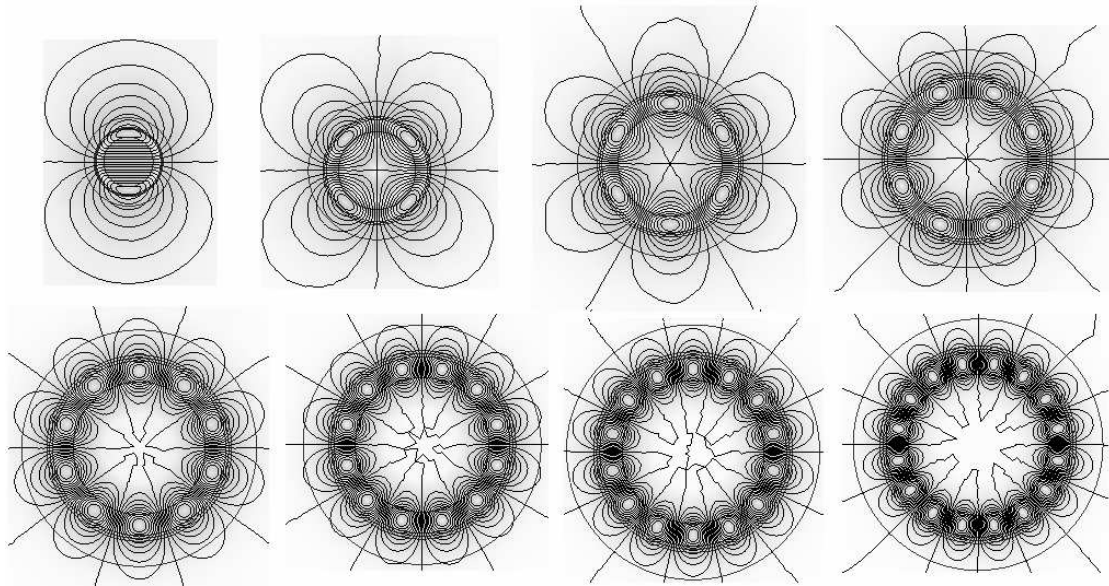


Fig 9. Líneas de flujo para las configuraciones de 1 hasta 8 pares de polos.

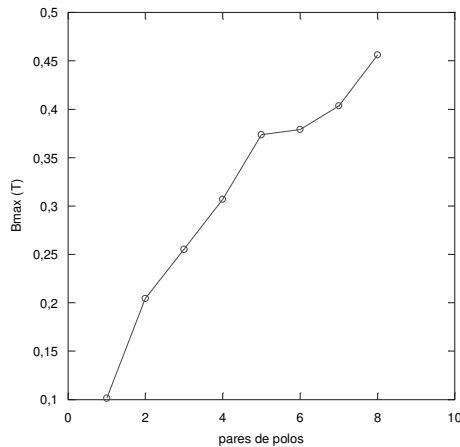


Fig 10. B_{max} en el casquillo en función del número de polos

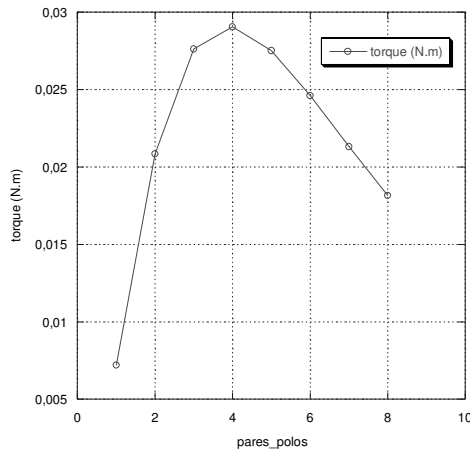


Fig 11. Torque para configuraciones con diferentes pares de polos

4. Conclusiones

Se han analizado las características del par de fuerza de un dispositivo electromagnético que funciona como caudalímetro. Mediante un programa de simulación basado en elementos finitos, se han simulado modelos

tanto en 2D como en 3D, con partes en movimiento relativo. Siguiendo con el trabajo publicado recientemente [2] se ha conseguido ajustar el modelo a simular de tal forma que los resultados de las simulaciones obtenidas están de acuerdo con las medidas realizadas con el prototipo físico. Así mismo, se han sugerido algunas mejoras en la geometría del dispositivo para su optimización. Se ha evaluado la influencia del número de polos del imán, y la presencia de anillos con objeto de obtener el máximo par de fuerza en el dispositivo. Así, ha quedado patente la importancia que tiene la presencia de los anillos de hierro, puesto que el par de fuerza aumenta por dos cuando incluimos un anillo y por tres cuando incluimos dos anillos en la configuración.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto PETRI (PTR 1995-0696-OP) subencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Los autores quieren agradecer a I. Oñate y a M.J. Arrieta, ambos de la empresa COPRECI S.Coop. en Aretxabaleta (Gipuzkoa), su ayuda por facilitar los datos de las medidas empleados en este trabajo.

Referencias

- [1] A.B.J. Reece, T.W. Preston, Finite element methods in electrical power engineering, Oxford University Press, 2000.
- [2] N. Vidal et al., Simulación y optimización de una copa de inducción por el método de los elementos finitos 3D/2D, XVRGIIIE, Zaragoza, 2005.
- [3] M. Pérez Donsión, M. A. Fernández Ferro, Motores síncronos de imanes permanentes, Universidad de Santiago de Compostela, 1990.
- [4] www.infolytica.com
- [5] S. J. Salon. Finite element analysis of electrical machine, Kluwer academic publishers. 1995.